استفاده از سنگ ساینده جهت ارزیابی رفتار سایشی فولادها*

مجید عباسی[۱] شهرام خیراندیش[۲] یوسف خرازی[۳] جلال حجازی[٤]

چکیده

در این مقاله، چگونگی استفاده از سنگ ساینده در آزمون پین روی دیسک برای ارزیابی رفتار سایش ساینده چند نوع فولاد با ریزساختارهای اولیه متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت. عواملی نظیر نوع فلز مورد آزمایش، نوع سنگ ساینده، میزان نیروی عمود بر پین، سرعت خطی دیسک و طول مسیر سایش بر میزان و مکانیزم سایش مطالعه شد. نتایج نشان داد که سختی اولیه فولاد نمی‌تواند به تنهایی مقاومت به سایش یک فولاد را تعیین نماید بلکه به ساختار اولیه و تغییرات ساختاری آن در اثر نیروهای سایشی باید توجه داشت. همچنین با انتخاب و طراحی صحیح آزمایش، استفاده از سنگ‌های ساینده می‌تواند روش مناسبی برای ارزیابی رفتار سایشی و تریبولوژیکی مواد مقاوم به سایش نظیر فولاد هادفیلد باشد. درحالی که این روش برای فولادهای نرم (ساده کربنی) مناسب نیست.

واژه‌های کلیدی پین روی دیسک، سنگ ساینده، تریبولوژی، سایش، سایش ساینده، فولاد هادفیلد.

Using the Abrasive Wheel for Evaluation of Abrasive Behavior of Steels

M. Abbasi S. Kheirandish Y. Kharrazi J. Hejazi

Abstract

In this paper, how to use the abrasive wheel in the pin on disk test was evaluated and developed for tribological studies of steels. Parameters such as type of pin (steel), type of abrasive wheel, normal load on pin, linear velocity of disk and sliding distance were studied. The results showed that initial hardness can not merely determine the wear resistance of a metal whereas it may be related to the surface hardness resulting from work hardening during abrasive. In addition, in the pin on disk method, using the abrasive wheel is a good choice for evaluation of tribological behavior of high wear resistance metals such as Hadfield steels while, it is not appropriate and proper for mild steel.

Key Words Pin on Disk, Abrasive Wheel, Tribology, Abrasive Wear, Hadfield Steel.

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۷/۹/۱۵ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۸/۱۲/۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) عهده دار مکاتبات: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(٤) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه

روش‌های متعددی برای بررسی رفتار سایشی و تریبولوژیکی مواد وجود دارد که در بین آنها روش پین روی دیسک روش شناخته شده‌ای است [2-1]. از این روش برای بررسی مقاومت به سایش انواع مواد فلزی [5-3] ، سرامیکی [6]، کامپوزیتی [7] و پوشش‌های سطحی روی مواد [8] استفاده می‌گردد. به طور معمول، نمونه به صورت پین و عامل ساینده به صورت دیسک فلزی تهیه می‌گردد. قابلیت طراحی در اندازه‌های مختلف، کنترل رطوبت، اتمسفر و دما در کنار قابلیت کنترل و اعتماد زیاد (تکرارپذیری مطلوب) از ویژگی‌های بارز این آزمون است[1].

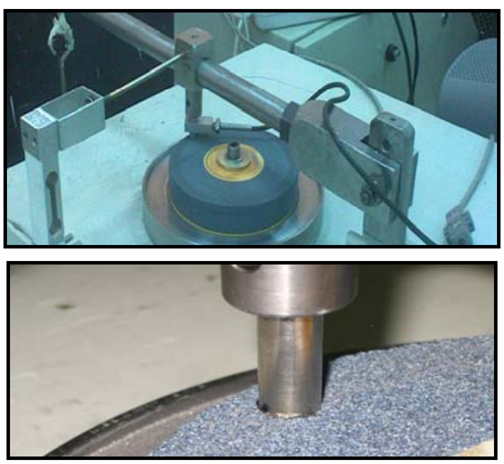
محدودیت عمده در این روش، ارزیابی آلیاژهای مقاوم به سایش نظیر فولاد هادفیلد و چدن‌های پرکروم است؛ چرا که شرایط کاربردی و مکانیکی این نوع مواد (پین) به گونه‌ای است که در صورت استفاده از دیسک‌های فولادی، نتایج مطلوبی حاصل نمی‌شود یا نتایج بدست آمده برای کاربردهای صنعتی نظیر گلوله‌ها و پوشش‌های آسیا که در تماس با مواد سخت غیرفلزی نظیر سنگ و ماسه‌اند، قابل استفاده نیست. از این رو، روش‌های مختلفی همچون روش جریان ذرات ساینده (نظیر ماسه) بر روی نمونه[9,10]، استفاده از سنگ سایشی [6]، استفاده از پین‌های زیرکونیایی در روش پین روی دیسک[11] برای ارزیابی رفتار تریبولوژیکی مواد مقاوم به سایش توسعه یافته است.

هدف اصلی این تحقیق، طرح و بررسی چگونگی استفاده از سنگ‌های ساینده در روش پین روی دیسک برای مطالعه رفتار تریبولوژیکی و سایشی مواد فلزی در شرایط سایش لغزشی(Sliding Wear) است.

روش تحقیق

روش آزمون و انتخاب سنگ ساینده. آزمایش سایش به روش پین روی دیسک و با استفاده از دستگاه مجهز به سیستم کنترل کامپیوتری (همراه با کنترل و ثبت دمای پین، ضریب اصطکاک، دور موتور و مسافت طی شده) انجام شد. نمونه مورد آزمایش به عنوان عضو ساییده شونده و به شکل استوانه با سطح صاف تهیه شد. همهٔ نمونه‌های فلزی با قطر ۱۰mm و ارتفاع ٤cm تهیه شدند. سطح سایش تمامی نمونه‌ها قبل از انجام سایش با استفاده از کاغذ سنباده شماره ٦۰۰ سنباده زده شدند تا زبری اولیه سطح در همهٔ نمونه‌ها یکسان باشد. آزمایش سایش در دمای محیط با رطوبت نسبی بین ٤۰ تا ٦۰ درصد و بدون روانکار و به صورت خشک انجام شده است.

در این آزمایش از سنگ ساینده به عنوان عامل ساینده استفاده شد. قطر سنگ ساینده، ۲۰ سانتی‌متر بود و از هر دو طرف آن و فقط برای یک‌بار در هر مسیر استفاده شد. شکل (۱) تصاویری از این سیستم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ تصاویری از دستگاه پین روی دیسک با استفاده از سنگ سایشی

در انتخاب سنگ ساینده عواملی چون جنس ذرات ساینده در سنگ، اندازه دانه‌بندی ذرات، تراکم سنگ (میزان پراکندگی دانه‌ها)، نوع چسب و استحکام پیوندی بین ذرات ساینده مهم می‌باشد [۱۲]. تعدادی آزمایش با دو نوع سنگ ساینده، نوع C با ساینده‌هایی از جنس SiC و نوع A با ساینده‌هایی از جنس Al_2O_3 با استحکام دانه‌بندی متفاوت انجام شد. سنگ سایشی اول دارای کد استحکام J (استحکام کم) و کد

استاندارد C80/3J8V60 (استحکام سنگ را با حروف انگلیسی از A تا Z نشان می‌دهند که هر چه کد استحکام سنگ به حرف Z نزدیک‌تر باشد، استحکام بالاتری دارد و میزان سایش آن به هنگام سنگ‌زنی یا آزمون سایش کمتر است[۱۲]. بر اساس استاندارد EN 12413 سطح کیفیتی سنگ‌ها، مورد تایید است) و نوع دوم دارای کد استحکام P (استحکام بالا) و کد استاندارد A36P4V بوده است. برای انجام آزمایش اصلی سایش، سنگ سایشی نوع دوم که استحکام بالاتری داشته و نتایج اولیه بهتری نشان داد، انتخاب شد.

جنس پین و اندازه‌گیری قابلیت آزمون سایش. برای شناسایی قابلیت این روش در ارزیابی رفتار سایشی انواع فولادها، سه نوع فولاد: آستنیتی منگنزی موسوم به هادفیلد، آستنیتی زنگ‌نزن نوع ۳۱۶L و ساده کربنی (فولاد نرم) انتخاب شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی هر نمونه در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

آزمایش سایش در شرایط ثابت از نظر نیروی عمودی (۵۰ نیوتن)، سرعت خطی دیسک (۰/۷ متربر ثانیه) و نوع سنگ تا طول مسیر سایش ۵۰۰ متر و تا ۵ بار تکرار انجام شد و میزان کاهش وزن آن به همراه شکل و اندازه محصولات سایش مورد بررسی قرار گرفته است.

برای اندازه‌گیری قابلیت آزمون از تابع ضریب تغییرات استفاده شد. ضریب تغییرات، C_v، برابر نسبت انحراف معیار، (S)، به متوسط مقادیر مربوط به هر یک از نمونه‌ها، $\overline{W}$، است. با ضرب این مقدار در ۱۰۰، انحراف معیار نسبی (Relative Standard Deviation (RSD or %RSD)) به دست می‌آید. این شاخص یک تابع بدون بعد است که برای مقایسه شاخص‌های مختلف و بررسی تکرارپذیری آزمون بسیار مناسب است [7,13].

$$C_v = \frac{S}{\overline{W}} \qquad (۱)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(W_i - \overline{W})^2}{n-1}}, \quad n = 5 \qquad (۲)$$

$$\overline{W} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(W_i)}{n}, \quad n = 5 \qquad (۳)$$

n تعداد مشاهده (تکرار) در هر آزمایش است.

بررسی اثر عوامل تریبولوژیکی. برای بررسی اثر نیروی عمود بر پین و سرعت خطی دیسک، آزمایش سایش بر روی فولادهای هادفیلد و ۳۱۶L تحت دو نیروی عمودی ۳۰ و ۷۰ نیوتنی و سرعت‌های خطی ۰/۵۵ و ۱/۱ متر برثانیه انجام شد. در هر ۲۵۰ متر طول مسیر سایش، کاهش وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد تا نمودار کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش تا ۲۵۰۰ متر حاصل شود. افزون بر این، میزان کاهش وزن در هر شرایط به همراه شکل و اندازه محصولات سایش مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه‌های فلزی (درصد وزنی)

نوع فولاد	C	Mn	Si	Ni	Cr	سایر
هادفیلد(ریختگی)	۱/٤	۱٤	۰/۳	–	–	Al= ۰/۲
۳۱٦L (میله‌گرد نوردی)	۰/۰۳	۲	۰/۷۵	۱۲	۱۸	Mo=۲
ساده کربنی (نرم) (میله‌گرد نوردی)	۰/۲	۰/٦	۰/۵	–	–	–

جدول ۲ خواص مکانیکی نمونه‌های فلزی

نوع فولاد	حداقل استحکام (MPa)		ازدیاد طول نسبی ٪	سختی (HB)	چگالی kg/m^3
	تسلیم	کششی			
هادفیلد(ریختگی *)	۳۹۵	۸۷۵	٤۸	۱۹۵	۷۷۰۰
۳۱٦L (میله‌گرد نوردی)	۱۷۰	٤۸۵	٤۰	۲۱۷	۸۰۰۰
ساده کربنی (نرم) (میله‌گرد نوردی)	۳۳۰	٤٤۸	۳٦	۱۵۰	۷۸۵۰
* نمونه‌های فولاد منگنزی ریختگی پس از انجام عملیات حرارتی محلولی و تندسرمایی در آب آماده شدند.					

مطالعات میکروسکوپی. برای مطالعات میکروسکوپی ذرات سایش و سطح ساییده شده از میکروسکوپ‌های نوری استریو مجهز به لنز دیجیتالی با قابلیت تصویربرداری از نورهای عبوری و بازتابی و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

برای مطالعات ریزساختاری مقطع عمودی سطح سایش، پس از برش، نمونه‌های متالوگرافی ابتدا مانت سرد شده و سپس با استفاده از کاغذ سنباده نوع SiC تا شماره ۱۲۰۰ ساییده و سرانجام با استفاده از پودر آلومینا ۱ و یک چهارم میکرومتر پولیش شدند. برای انجام اچ از محلول‌های نایتال ۳ درصد و اسید کلریدریک ۲۰ درصد (برای از بین بردن لایه نارنجی رنگ) استفاده شد[14].

اندازه‌گیری مقاومت به سایش. برای مطالعه میزان نرخ سایش و مکانیزم‌های مؤثر بر فرآیند سایش از توابعی نظیر میزان کاهش وزن، میزان نرخ سایش و شاخص مقاومت به سایش استفاده شد که به شرح زیر تشریح می‌گردند:

معکوس نرخ سایش به عنوان شاخص مقاومت به سایش به صورت زیر تعریف و استفاده شد[7]:

$$W_R = \frac{1}{W_L^0} \qquad (٤)$$

که در آن W_R شاخص مقاومت به سایش بر حسب Nm/mm^3 و W_L^0 نرخ سایش است که با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است[7]:

$$W_L^0 = \frac{\Delta m}{\rho.L.F_N} \qquad (٥)$$

که W_L^0 نرخ سایش بر حسب $mm^3/m.N$، Δm جرم از بین رفته نمونه در طول سایش بر حسب گرم، ρ چگالی نمونه بر حسب g/cm^3، L طول مسیر سایش بر حسب متر و F_N نیروی عمود بر روی پین بر حسب نیوتن است. میزان کاهش وزن با استفاده از یک ترازوی دقیق با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد.

سختی‌سنجی، زبری سنجی و اندازه‌گیری ضریب اصطکاک. با برش طولی روی نمونه ساییده شده، توزیع سختی از سطح ساییده شده به روش میکروسختی‌سنجی ویکرز تحت نیروی ۰/۰۱ نیوتن و به مدت ۲۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از دستگاه زبری‌سنج TR200، زبری سطح ساییده شده در مسیری به طول ٤mm از مرکز نمونه با سه بار تکرار و با دقت ۰/۸ میکرومتر انجام شد.

ضریب اصطکاک، μ، براساس رابطه (٦) محاسبه شده است که برابر نسبت نیروی افقی، F_F (حاصل از اصطکاک) به نیروی عمودی F_N وارد بر پین (حاصل از وزنه‌ها) است. از یک نیروسنج دیجیتالی با دقت $\pm 1N$، برای اندازه‌گیری نیروی افقی وارد بر پین استفاده شده است. این اندازه‌گیری به صورت درجا در طول آزمایش صورت گرفته است.

$$\mu = \frac{F_F}{F_N} \qquad (6)$$

نتایج و بحث

بررسی رفتار سایشی. در جدول (۳) مقادیر مربوط به میزان سایش سه نوع فولاد و در شکل (۲)، میزان مقاومت به سایش بر حسب سختی اولیه و سختی نهایی سطح ساییده شده ارائه شده است. همچنین، شکل (۳) توزیع سختی از سطح ساییده شده تا عمقی از آن را برای سه فولاد نشان می‌دهد.

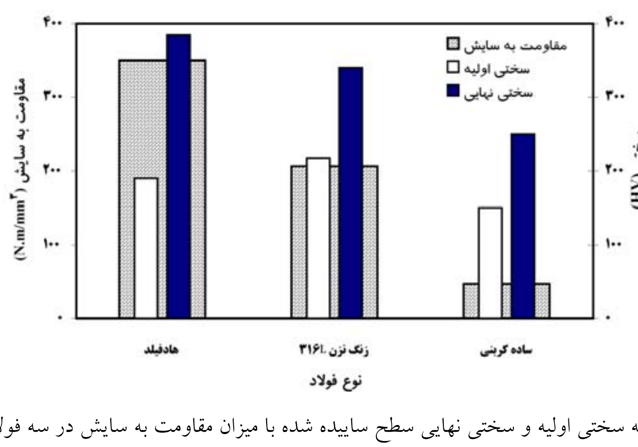
مطابق جدول (۳)، مشخص است که میزان کاهش وزن نمونه‌های فولاد ساده کربنی (نرم) در مقابل دو نوع فولاد دیگر به شدت زیاد است. در حالی که سختی اولیه ۳ فولاد خیلی با یکدیگر تفاوت ندارند.

مطابق شکل‌های (۲) و (۳)، مشاهده می‌گردد که هر چند سختی اولیه فولاد ۳۱۶L از فولاد هادفیلد بیشتر است ولی ظرفیت کارسختی آن کمتر است (توجه شود که ساختار اولیه هر دو فولاد آستنیت است). سختی سطح ساییده شده فولاد ۳۱۶L از ۲۴۵ ویکرز به حدود ۳۴۰ ویکرز افزایش می‌یابد که کمتر از سختی سطح فولاد هادفیلد (حداقل ۳۸۰ ویکرز) است. بنابراین مشاهده می‌گردد که مقاومت به سایش تابعی از سختی اولیه ماده نیست و حتی با در نظر گرفتن سختی واقعی سطح ساییده شده هم نمی‌توان به طور دقیق رفتار سایشی را پیش‌بینی کرد؛ بلکه باید به تغییر رفتار مکانیکی و ساختاری سطح در اثر نیروهای سایشی توجه داشت.

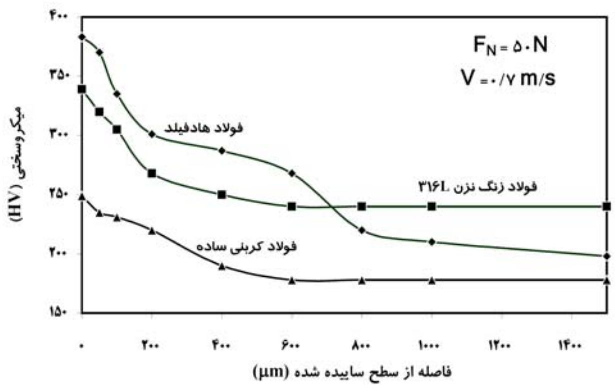
جدول ۳ میزان سایش سه نوع فولاد در آزمون پین روی سنگ ساینده در سرعت خطی ۰/۷ متر بر ثانیه، نیروی عمودی ۵۰ نیوتن و طول مسیر سایش ۵۰۰ متر

نوع فولاد	میزان کاهش وزن (mg)		ضریب تغییرات (درصد) *	میزان کاهش حجم (mm^3)		کاهش ارتفاع نمونه (mm) (محاسبه شده)	$K \times 10^{-3}$ $mm^3/m.N$	K^{-1}
	متوسط	انحراف معیار		متوسط	**انحراف معیار**			
آستنیتی منگنزی (هادفیلد)	۵۵۰	۲۵	۴/۵	۷۱	۳/۲	۰/۹۸	۲/۸۶	۳۵۰
آستنیتی زنگ‌نزن ۳۱۶L	۹۷۰	۵۰	۵	۱۲۱	۶/۲۵	۱/۵۴	۴/۸۴	۲۰۶
ساده کربنی (فولاد نرم)	۴۲۰۰	۶۵۰	۱۵/۵	۵۳۵	۱۸۳	۶/۸	۲۱/۴	۴۷

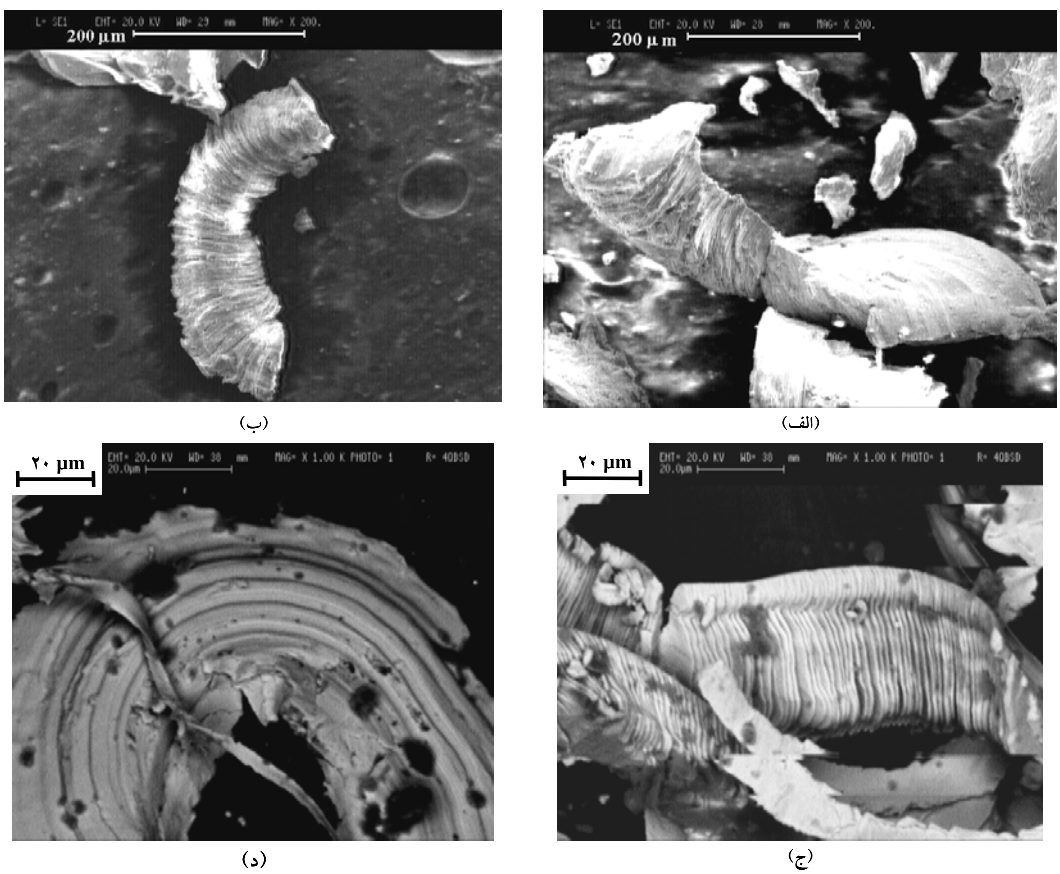
• ضریب تعییرات شاخصی بدون بعد است که نسبت انحراف معیار به متوسط را بیان می‌کند. هر چه ضریب تغییرات بیشتر باشد، پراکندگی داده‌ها نسبت به مقدار متوسط بیشتر است؛ به عبارت دیگر تکرارپذیری آزمایش کمتر است.



شکل ۲ رابطه سختی اولیه و سختی نهایی سطح ساییده شده با میزان مقاومت به سایش در سه فولاد مختلف.



شکل ۳ تغییرات سختی از سطح ساییده شده در سه نمونه فولاد هادفیلد، ۳۱۶L و ساده کربنی.

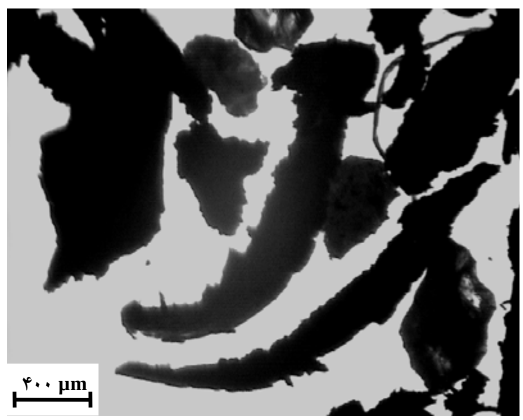


شکل ٤ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نشانه‌های تغییر شکل پلاستیک روی ذرات سایش حاصل از کندگی سطح در اثر سایش خراشان: الف) فولاد ساده کربنی، ب) فولاد ۳۱٦L و ج و د) فولاد هادفیلد.

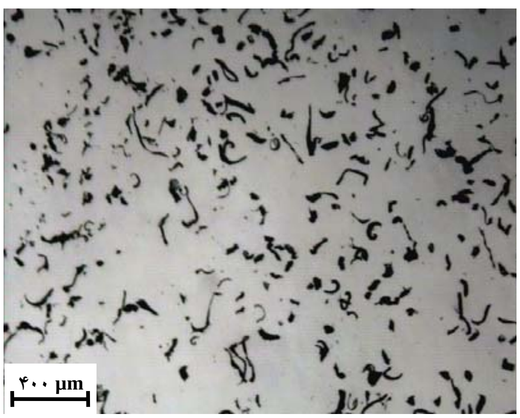
در آزمایش پین روی سـنگ بـه ماننـد عملیـات سنگ‌زنی، نیروهای برشی عامل اصلی جدا شدن مـواد از روی سطح فلزات و آلیاژهـای نـرم هـستند [1,15]. مطابق شـکل (۳)، مـشخص اسـت کـه سـختی سـطح

ساییده شده فولاد ساده کربنی از حدود ۱۷۰ ویکرز به ۲۵۰ ویکرز افزایش می‌یابد که در مقایسه با کارسخت شدن فولاد هادفیلد و زنگ‌نزن بسیار پایین است. بروز این رفتار در فولاد ساده کربنی (نرم) به این علت است که این فولاد دارای ساختار فریت – پرلیتی است. این ساختار دو فازی دارای استحکام تسلیم و سختی کم است و امکان کار سخت شدن آن از طریق تغییر شکل پلاستیک بسیار محدود است، (جدول ۲). بنابراین سطح این فولاد تحت نیروهای برشی حاصل از ذرات بسیار سخت سنگ، به راحتی خراشیده می‌گردد. این خراشیدگی آن چنان شدید است که تراشه‌های سایشی در تمام مراحل سایش با تغییر شکل پلاستیک از روی سطح کنده می‌شوند. در شکل (٤)، نشانه‌های تغییر شکل پلاستیک زیاد و شیارهای حاصل از ذرات ساینده روی تراشه‌ها به خوبی نمایان است.

همچنین مطابق شکل (۵)، تصاویر میکروسکوپی تراشه‌های حاصل از سایش نشان می‌دهد که تراشه‌های فولاد نرم بسیار بزرگ‌تر از تراشه‌های فولاد هادفیلد است. بنابراین با توجه به توزیع سختی و مورفولوژی تراشه‌های سایش، مشخص است که مکانیزم سایش در فولاد ساده کربنی، سایش خراشان (خیش خوردن) در اثر برش تراشه‌های بزرگ است [10].

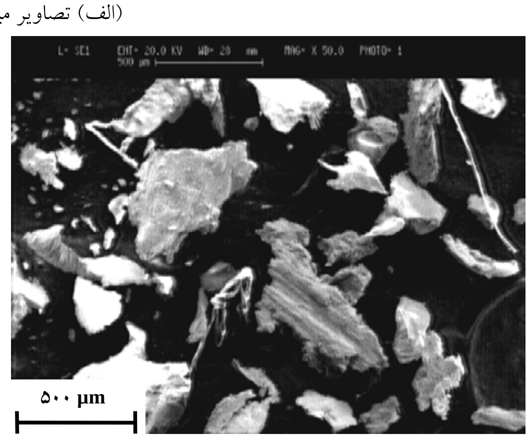


(فولاد ساده کربنی)

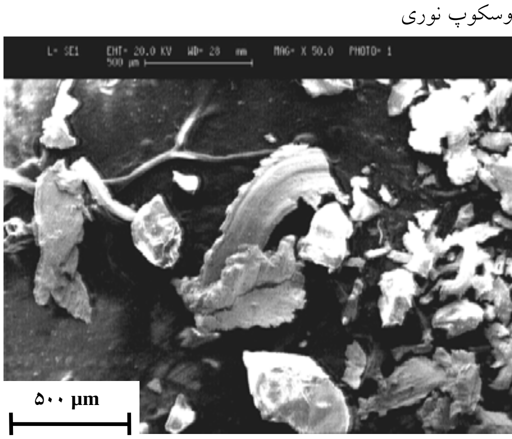


(فولاد هادفیلد)

(الف) تصاویر میکروسکوپ نوری



(فولاد ساده کربنی)



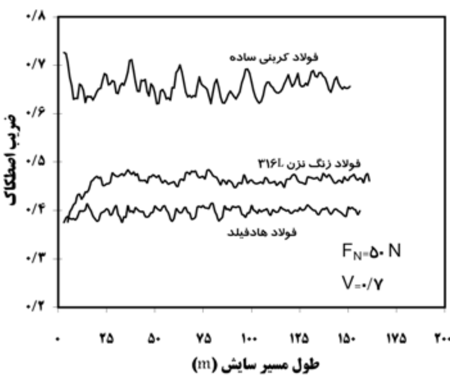
(فولاد ۳۱٦L)

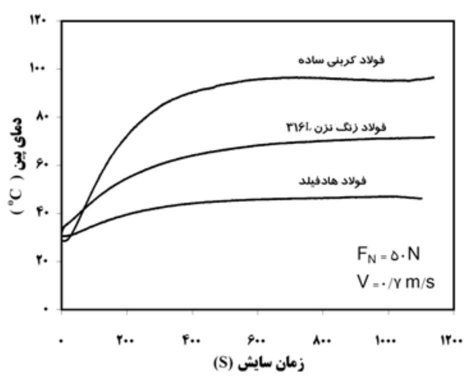
(ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از شکل تراشه‌های حاصل از سایش: (الف) میکروسکوپ نوری و (ب) SEM

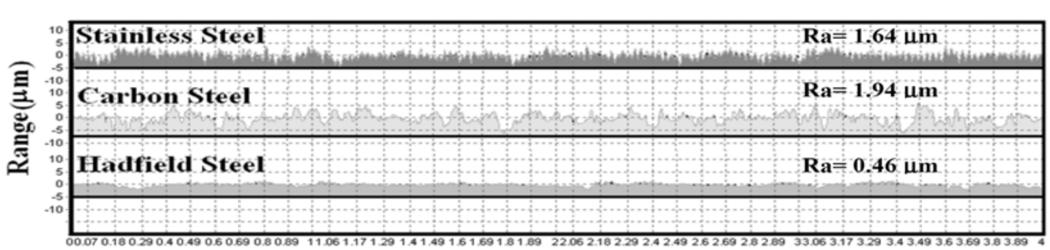
از دیگر سو، در حین آزمایش نمونه‌های فولاد ساده کربنی، مشاهده شد که ارتعاش دستگاه نمایان و بسیار زیاد است. نتایج اندازه‌گیری ضریب اصطکاک نشان می‌دهد که این ضریب برای فولاد ساده کربنی بالا (حدود ۰/٦٥) می‌باشد، (شکل ٦- الف). بالا بودن ضریب اصطکاک در این سیستم سایش به خاطر اختلاف شدید سختی سطح فولاد (۲۵۰ ویکرز) و سختی ذرات ساینده (بیش از ۲۰۰۰ ویکرز) است که نفوذ ذرات سخت سنگ به داخل سطح فولاد و در نتیجه برش عمیق سطح را موجب می‌شود[15]. همچنین اندازه ذرات ساینده سنگ (۱۰۰-۲۰۰ میکرومتر) بزرگ‌تر از فازهای سخت کاربیدی (حداکثر ۳۰ میکرومتر) در داخل زمینه فریت می‌باشند. در نتیجه به هنگام برش مکرر و عمیق این تراشه‌ها از روی سطح، ارتعاش دستگاه زیاد می‌گردد [۱۵]. این عمل باعث افزایش بیشتر دمای پین نسبت به دو فولاد دیگر می‌شود، (شکل ٦- ب). همچنین زبری سنجی نشان می‌دهد که زبری سطح فولاد ساده کربنی در حدود ۲ میکرومتر و خشن‌تر نسبت به دو فولاد دیگر می‌باشد، (شکل ۷).

مقایسه دمای پین (شکل ٦-ب)، ضریب اصطکاک (شکل ٦-الف)، سختی سطح ساییده شده (شکل ۳) و میزان سایش سه فولاد نشان می‌دهد که هر چه آلیاژ مقاومت به سایش بیشتری داشته باشد، سختی سطح ساییده شده آن بیشتر و در نتیجه ضریب اصطکاک آن و دمای پین آن کمتر است.





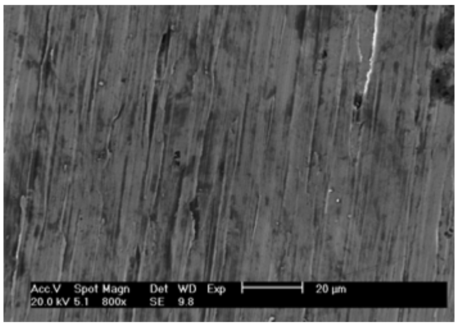
شکل ٦ الف) تغییرات ضریب اصطکاک و ب) تغییرات دمای سطح نمونه فولادهای هادفیلد، ۳۱٦L و ساده کربنی در آزمون سایش پین روی سنگ تحت نیروی ۵۰ نیوتن و سرعت خطی ثابت ۰/۷ متر بر ثانیه.



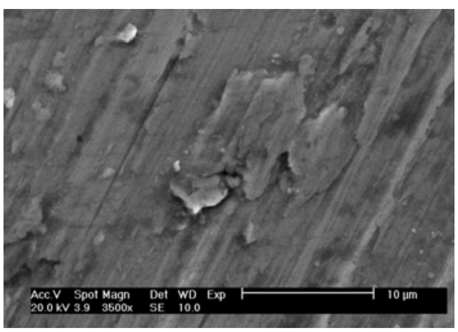
شکل ۷ تغییرات زبری سطح ساییده شده در سه نمونه فولادهای هادفیلد، ۳۱٦L و ساده کربنی تحت نیروی ۵۰ نیوتن و سرعت خطی ۰/۷ متربر ثانیه

در فولاد هادفیلد پدیده کندگی به راحتی اتفاق نمی‌افتد و فقط به مراحل اولیه سایش که سختی اولیه آن پایین است، محدود می‌شود. این فولاد علاوه بر دارا بودن چقرمگی زیاد از ظرفیت کارسختی بالا نیز برخوردار است. شکل (۳) به خوبی نشان می‌دهد که در اثر نیروهای سایشی، سختی سطح ساییده شده از حدود ۲۰۰ ویکرز به ۳۸۰ ویکرز افزایش می‌یابد و همچنین عمق لایه کارسخت شده در آن به حدود ۶۰۰ میکرومتر می‌رسد که بیشتر از دو فولاد دیگر است. مطابق شکل (٤-ج)، نشانه‌های تغییر شکل پلاستیک روی ذرات سایش نشان می‌دهد که در مراحل اولیه سایش مکانیزم کندگی در سطح فولاد هادفیلد به صورت تغییر شکل برشی روی صفحات کریستالی مشخصی که همان صفحه پرتراکم (۱۱۱) است [16]، رخ می‌دهد. این اثر روی سطح سایش به صورت شیارهای عمیق مشاهده می‌گردد، (شکل ۸-الف).

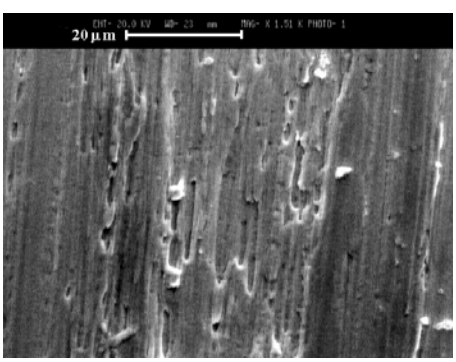
مطابق شکل (۹)، مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که در اثر نیروهای سایشی زمینه تک فاز آستنیت تغییر شکل داده و در آن دوقلویی ایجاد می‌گردد. این تغییر رفتار آستنیت، سبب افزایش سختی می‌گردد. تحقیقات محققان در زمینه مکانیزم تغییر شکل پلاستیک و کارسختی در فولاد هادفیلد حاکی است که دوقلویی شدن به همراه پیرسازی کرنشی دینامیکی عوامل اصلی تغییر شکل پلاستیک و افزایش سختی و در نتیحه افزایش مقاومت به سایش فولاد هادفیلد هستند [16,17]. بنابراین با تغییر رفتار مکانیکی در سطح فولاد هادفیلد، جدا شدن محصولات سایش از سطح آن به واسطه تغییر شکل پلاستیک محدود می‌شود و به سختی و با تأخیر بیشتر نسبت به فولاد ساده کربنی انجام می‌پذیرد. در نتیجه پس از کارسخت شدن شدید سطح، تراشه‌ها در اثر جوانه‌زنی و رشد ترک به صورت بسیار ریز و با ضخامت کم ظاهر می‌شوند، (شکل ۸-ب) [18]. مقاومت به سایش فولاد آستنیتی زنگ‌نزن ۳۱٦L هر چند بهتر از فولاد هادفیلد نیست ولی نسبت به فولاد ساده کربنی بسیار بالاتر است. مکانیزم اصلی در این خانواده از فولادها، استحاله مارتنزیتی در اثر تغییر شکل پلاستیک است[19]. از این رو، سطح نمونه در اثر نیروهای سایشی، به ساختار مارتنزیتی استحاله یافته و سختی آن افزایش می‌یابد.



الف) فولاد هادفیلد



ب) فولاد هادفیلد



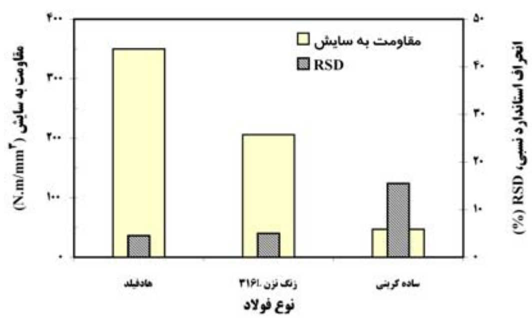
ج) فولاد ۳۱٦L

شکل ۸ تصاویری از سطح ساییده شده الف و ب) فولاد هادفیلد و ج) فولاد ۳۱٦L.



(الف) (ب)

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ (الف) نوری و (ب) الکترونی روبشی از نشانه‌های تغییر شکل پلاستیک. (به وجود میکرودوقلویی و باندهای لغزشی در درون منطقه دوقلویی شده تصویر ب توجه شود)



شکل ۱۰ رابطه مقاومت به سایش بر حسب ضریب تغییرات یا انحراف معیار نسبی برای سه فولاد مختلف

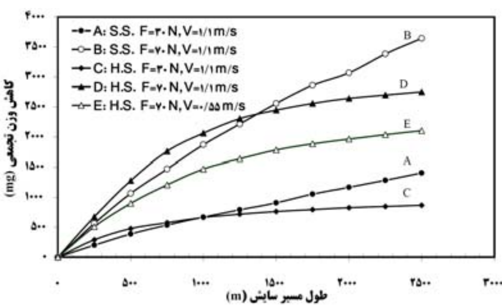
بررسی قابلیت آزمون. شکل (۱۰)، میزان مقاومت به سایش را با ضریب تغییرات یا انحراف معیار نسبی سه فولاد مختلف مقایسه می‌کند. مقایسه ضریب تغییرات در سه نوع فولاد نشان می‌دهد که روش پین روی سنگ‌های ساینده برای ارزیابی رفتار تریبولوژیکی فولاد ساده کربنی مناسب نیست چرا که پراکندگی داده‌های بدست آمده نسبت به مقدار متوسط مشاهده شده آن بسیار زیاد است؛ به عبارت دیگر تکرارپذیری آزمون روی این ماده بالا نیست. در حالی که روش یاد شده برای فولاد هادفیلد و فولاد ۳۱۶L روش مناسبی است و خطا یا پراکندگی داده‌ها در آن بسیار کم است. البته می‌توان با انتخاب سنگ‌های ساینده با دانه‌بندی‌های بسیار ریزتر و متراکم‌تر و نیروی عمودی و سرعت خطی کمتر، قابلیت این آزمون را برای فولاد نرم مورد بررسی مجدد قرار داد. بنابراین با طراحی صحیح متغیرهای آزمایش می‌توان با استفاده از سنگ ساینده، رفتار سایشی فولادهای مقاوم به سایش نظیر فولاد هادفیلد و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را مورد ارزیابی قرار داد.

اثر عوامل تریبولوژیکی (نیروی عمودی و سرعت خطی). در شکل (۱۱)، اثر نیرو و سرعت خطی دیسک بر رفتار سایشی فولادهای هادفیلد و آستنیتی زنگ‌نزن ۳۱۶L نشان داده شده است. در شکل (۱۱- الف) تغییرات کاهش وزن تجمعی و در شکل (۱۱- ب) مقاومت به سایش بر حسب طول مسیر سایش نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در مورد فولاد هادفیلد در تمامی شرایط، میزان کاهش وزن در مراحل اولیه بسیار زیاد است و پس از طی مسیر حدود ۱۰۰۰ متر، میزان نرخ کاهش وزن ثابت

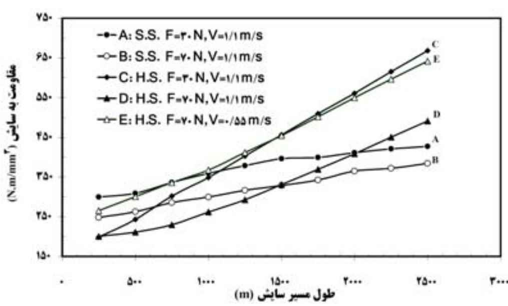
می‌شود. در حالی که در مورد فولاد آستنیتی زنگ‌نزن ۳۱۶L مشاهده می‌گردد که رفتار کاهش وزن آن از همان ابتدا، خطی می‌باشد. همچنین مقایسه نمودارهای کاهش وزن دو فولاد مورد نظر در یک شرایط یکسان (A با C و یا B با D) نشان می‌دهد که در مراحل اولیه سایش، مقاومت به سایش فولاد آستنیتی زنگ‌نزن کمی بیشتر از فولاد هادفیلد است. ولی در ادامه فرآیند سایش، این رفتار تغییر می‌کند. دلیل این تفاوت آشکار، مکانیزم و میزان نرخ کارسختی در دو فولاد است.

همان‌طور که اشاره شد، در فولاد هادفیلد مکانیزم اصلی تغییر شکل پلاستیک، ایجاد دوقلویی‌های مکانیکی و لغزش است [20,21] ، در حالی که در فولاد آستنیتی زنگ‌نزن، استحاله آستنیت به مارتنزیت عامل تغییر شکل پلاستیک و افزایش سختی می‌باشد[19]. در اثر استحاله مارتنزیتی، چقرمگی سطح به شدت کاهش می‌یابد، جدول (۲)، در حالی که در فولاد هادفیلد، به علت عدم ایجاد استحاله فازی، ساختار از چقرمگی مناسبی برخوردار است. بنابراین بالا بودن نرخ کارسختی در فولاد هادفیلد همراه با چقرمگی بالای آن سبب می‌گردد که مقاومت به سایش فولاد هادفیلد در مسیرهای طولانی‌تر سایش، بیشتر شود[۲۲،23].

همچنین با مقایسه منحنی‌های مربوط به فولاد هادفیلد در شکل (۱۱- ب) با شکل (۱۱- الف) (منحنی‌های D ،C و E) می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت مقاومت به سایش فولاد هادفیلد در حالت‌های مختلف مورد بررسی و در مراحل اولیه سایش به علت کاهش وزن زیاد در شرایط سایش شدید بسیار زیاد است. با گذشت زمان و کارسخت شدن سطح تفاوت در معیار مقاومت به سایش در دو شرایط C و E به حداقل می‌رسد، حال آنکه مقاومت به سایش در شرایط سایشی D، همچنان کمتر از دو حالت دیگر است. از این رو نتیجه دومی که می‌توان اتخاذ کرد این است که برای استفاده بهینه و کاهش میزان سایش اولیه فولاد هادفیلد، ابتدا باید قبل از استفاده در محل کار، سطح آن را با اعمال نیروهای سایشی کم کارسخت کرد. به دیگر عبارت، با اعمال نیروهای کم قبل از اعمال نیروهای زیاد سایشی، سطح تحت نیروهای فشاری قرار می‌گیرد و به طور نسبی کار سخت می‌گردد. این کارسخت شدن نسبی سطح باعث می‌گردد که میزان سایش در حین اعمال نیروهای شدید در مرحله اول کمتر شود. با انجام این عمل، میزان سایش نهایی فولاد خیلی کمتر خواهد شد. بعضی از محققان انجام عملیات ساچمه‌کوبی را پیش از استفاده در محل کار پیشنهاد می‌کنند [20].



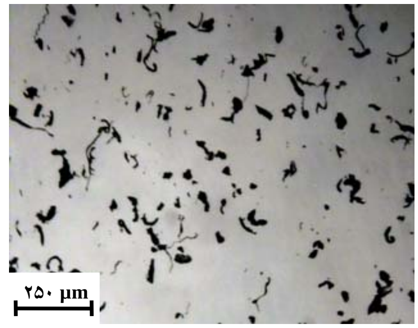
(الف)



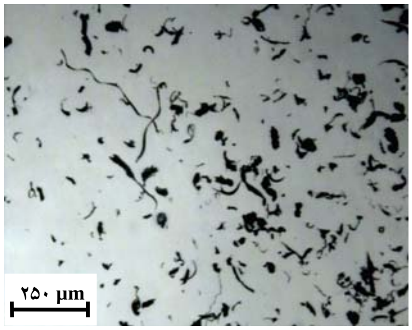
(ب)

شکل ۱۱ اثر عوامل سایشی بر الف) میزان کاهش وزن و ب) شاخص مقاومت به سایش فولاد هادفیلد (H.S.) و فولاد آستنیتی زنگ نزن ۳۱۶L (S.S.).

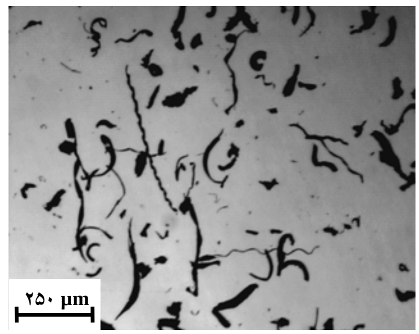
در شکل (۱۲)، شکل تراشه‌های حاصل از سایش فولاد هادفیلد در شرایط مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با بیشتر شدن سرعت و نیرو، اندازه تراشه‌های سایش بزرگ‌تر می‌شوند. تفکیک این تراشه‌ها در مراحل مختلف نشان می‌دهد که تراشه‌های با طول بزرگ‌تر، مربوط به سایش در مراحل اولیه است که سطح نمونه سختی کمتری دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نیرو و سرعت خطی، میزان کاهش وزن افزایش می‌یابد.



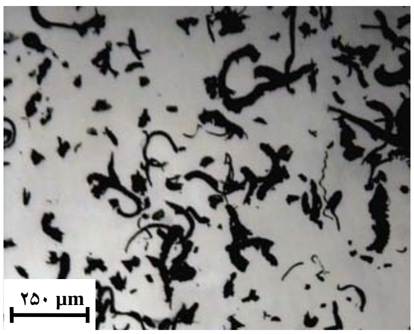
الف) ۳۰ نیوتن و ۰/۵۵ متر بر ثانیه



ب) ۳۰ نیوتن و ۱/۱ متر بر ثانیه



ج) ۷۰ نیوتن و ۰/۵۵ متر بر ثانیه



د) ۷۰ نیوتن و ۱/۱ متر بر ثانیه

شکل ۱۲ شکل تراشه‌های سایش نمونه‌های فولاد هادفیلد در نیروهای عمودی و سرعت‌های خطی مختلف در یک بزرگنمایی.

هر چه نیروی اعمالی بیشتر باشد، سطح نمونه به مقدار بیشتری کار سخت می‌شود. ولی تا رسیدن به سختی مطلوب، سایش اولیه آن زیاد است و محصولات سایش به صورت تراشه‌های باریک و بلند ایجاد می‌شود؛ بنابراین تا ایجاد حجم مناسبی از دوقلوها و کار سخت شدن سطح، سایش اولیه زیاد است[23].

نتیجه‌گیری

۱- استفاده از سنگ ساینده در آزمون پین روی دیسک را می‌توان روشی مناسب برای ارزیابی رفتار تریبولوژیکی مواد مقاوم به سایش از جمله فولاد هادفیلد قلمداد نمود.

۲- استفاده از سنگ ساینده روش مناسبی برای ارزیابی رفتار سایشی فولادهای ساده کربنی نیست. در صورت نیاز لازم است با استفاده از سنگ‌های ساینده با دانه‌بندی بسیار ریز و تراکم بالا، قابلیت این روش را مورد بررسی مجدد قرار داد.

۳- سختی اولیه فلز را نمی‌توان معیاری برای تعیین مقاومت به سایش تلقی نمود. بلکه باید به رفتار کارسختی فلز ساییده شونده در اثر نیروهای سایشی توجه نمود.

٤- با بررسی اثر نیرو بر میزان سایش اولیه، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال پیش تنش و یا کرنش کم روی سطح کاربردی فولادهای هادفیلد قبل از استفاده از آن‌ها در شرایط سایش سخت، می‌توانند مقاومت به سایش را بسیار بهبود بخشد.

تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت‌های مالی وزارت صنایع (دبیرخانه طرح تحقیقات اساسی بخش صنعت و معدن) و شرکت‌های ریخته‌گری فولاد طبرستان و ریخته‌گری دقیق ساری انجام شده است.

مراجع

1. G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, Engineering Tribology, Chapter 10, Butterworth Heinemann, (2000).
2. R.G. Bayer, Mechanical Wear Fundamentals and Testing, *2nd Edition*, *Marcel Dekker Inc.*, USA, (2004).
3. Y. Sun, H. Ahlatci, E. Ozdogru and H. Cimenoglu, "Dry sliding wear behaviour of Fe–0.4C–25Cr–XNi cast steels", Wear, 261, pp.338–346, (2006).
4. A. Mandal, M. Chakraborty and B.S. Murty, "Effect of TiB_2 particles on sliding wear behaviour of Al–4Cu alloy", Wear, 262, pp.160-166, (2007).
5. G. Cueva, A. Sinatora, W.L. Guesser and A.P. Tschiptschin, "Wear resistance of cast irons used in brake disk rotors", Wear, 255, pp.1256–1260, (2003).
6. L.J. Yang, Pin-on-disc wear testing of tungsten carbide with a new moving pin technique, Wear, 225–229, pp.557–562, (1999).
7. A.Y. Mosbah, D. Wexler and A. Calka, "Abrasive wear of WC–FeAl composites", Wear, 258, pp.1337–1341, (2005).
8. M.J. Whiting, "An investigation of improving wear of 390 die-cast aluminum through hardcoat anodizing", M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, December (2005).
9. S.J. Wiche, S. Keys and A.W. Roberts, "Abrasion wear tester for bulk solids handling applications", Wear, 258, pp.251–257, (2005).
10. D.M. Kennedy and M.S.J. Hashmi, "Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials", *J. of Materials Processing Technology*, 77, pp.246–253, (1998).
11. D.H. Jeong, F. Gonzalez, G. Palumbo, K.T. Aust and U. Erb, "The effect of grain size on the wear properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings, Scripta Mater., 44, pp.493–499, (2001).
۱۲.استیو کرار، ترجمه اکبر شیرخورشیدیان، مرجع کامل تکنولوژی سنگ‌زنی، نشر طراح، (۱۳۸٤).
13. D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, (2000).
14. ASM Handbook, 10th Edition, Vol. 9, Metallography and Microstructures, "Austenitic Manganese Steel Castings", (2004).
15. M.J. Neale, The Tribology Handbook, Second edition, Section E8, Mechanisms of Wear, Butterworth-Heineman, (2001).
16. Y.N. Dastur and W.C. Leslie, "Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel", Metallurgical Transaction A, 12, pp.749-759, May (1981).
17. R.W. Smith, A. DeMonte and W.B.F. Mackay, "Development of high-manganese steels for heavy duty cast-to-shape applications", *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154, pp.589–595, (2004).

18. S. Bhattacharyya, "A friction and wear study of Hadfield manganese steel", Wear, 9, Issues 6, November-December, pp.451-461, (1966).
19. M. Zandrahimi, M.R. Bateni, A. Poladi and J.A. Szpunar, "The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel", Wear, 263, Issues 1-6, pp.674-678, (2007).
20. W. Yan, L. Fang, K. Sun and Y. Xu, "Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel", Materials Science and Engineering A, 460–461, pp.542–549, (2007).
21. M. Abbasi, Sh. Kheirandish, Y. Kharrazi and J. Hejazi, "The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels", *Materials Science and Engineering A*, 513–514, pp.72–76, (2009).
۲۲. م. عباسی، ش. خیراندیش، ی. خرازی، ج. حجازی، "بررسی تاثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد"، مجله علوم و مهندسی سطح، شماره ۷، ۶۹-۸۰، (۱۳۸۷).
23. M. Abbasi, Sh. Kheirandish, Y. Kharrazi and J. Hejazi, "On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels", Wear, 268, pp.202-207, (2010).